

## 어린이 주요 활동 공간에서의 금속 원소류 다경로 노출에 의한 건강 위해성 평가

양지연 · 김호현 · 양수희 · 김선덕 · 이청수 · 김태훈 · 손종렬<sup>1)</sup> · 신동천<sup>2)</sup> · 임영욱\*

연세대학교 의과대학 환경공해연구소, <sup>1)</sup>고려대학교 보건과학대학,

<sup>2)</sup>연세대학교 의과대학 예방의학교실

### Health risk assessment of trace elements exposure through multi pathways in children's facilities

Ji-Yeon Yang, Ho-Hyun Kim, Su-Hee Yang, Sun-Duk Kim, Chung-Soo Lee,

Tae-Hoon Kim, Jong-Ryeul Sohn<sup>1)</sup>, Dong-Chun Shin<sup>2)</sup> and Young-Wook Lim\*

*Institute for Environmental Research, Yonsei University college of medicine, Seoul, Korea*

<sup>1)</sup>*College of Health Science, Korea University, Seoul, Korea*

<sup>2)</sup>*Department of Preventive Medicine, Yonsei University college of medicine, Seoul, Korea*

#### Abstract

This study assessed the health risk of trace elements in indoor children-facilities by multi-pathway measurements (Air, Dust, Wipe, Hand washing). The samples of indoor place were collected at various children's facilities (40 day-care houses, 42 child-care centers, 44 kindergartens, and 42 indoor playgrounds) in summer (Jul-Sep, 2007) and winter (Jan-Feb, 2008) periods, and analyzed by ICP-MS. The lifetime Excess Cancer Risks (ECRs) were estimated for carcinogen trace elements such as As, Cd, Cr and Ni. For carcinogens, the Excess Cancer Risk (ECR) was calculated by considering the process of deciding Cancer Potency Factor (CPF) and Age Dependent Adjust Factor (ADAF) of the data of adults. Both Hazard Quotients (HQs) and Hazard Index (HI) were estimated for the non-carcinogens and children sensitivity trace elements like Cd, Cu, and Cr. The average ECRs for young children were  $1 \times 10^{-10} \sim 1 \times 10^{-6}$  (50%th percentile) level in all facilities. Non-carcinogens and Children's sensitivity materials did not exceed 1.0 (HQs, HI) for all subjects in all facilities. For trace elements their detection rates through multi-pathways were not high and their risk based on health risk assessment was also observed to be acceptable. In addition, through education on the risk of multi-pathway exposure of trace elements for managers of facilities as well as for users the risk control of exposure of children.

**Keywords :** Trace elements, Children's facilities, Risk assessment, Multi-pathways

\* Corresponding author. Tel:+82-2-2228-1898, E-mail : envlim@yuhs.ac

\* 투고일 : 2011.01.12 1차수정일: 2011.02.19 게재확정일: 2011.02.22

## 1. 서 론

유해 금속 원소들 (Trace metals)은 도심 환경 내에 실내외 환경을 오염시키고 (Thornton, 1993) 호흡, 섭취 및 피부접촉의 경로를 통해 인구집단에 노출된다고 보고되고 있다 (Mielke and Reagan, 1998; Boyd et al., 1999). 금속 원소 중 대표적인 물질인 납 (Pb)의 경우 인테리어 제품에 사용된 페인트로 인한 바닥먼지 (House dust), 실내공기 (Indoor Air), 실외 먼지 (Dust) 및 토양 등의 경로로 전이되며, 어린이에 장기 노출시 신경독성 영향 등 유해한 영향을 끼친다고 보고된 바 있다 (Thatcher et al., 1982; Adgate et al., 1995).

카드뮴 (Cd), 수은 (Hg), 비소 (As), 크롬 (Cr), 니켈 (Ni) 등도 동일한 경로를 가지고 있는 주요 관심물질이며, 환경 중 증가된 오염농도로 인한 잠재적인 영향 및 기타 독성과의 관련성 즉, 공중보건에 대한 관심과 연구가 최근까지 진행되어 왔다 (Purves and Mackenzie, 1970; Lin et al., 1998; Mesilio et al., 2003; Lee et al., 2005).

최근의 전 세계적인 환경 문제로 인한 공중보건학적 관심에 의해 금속 원소의 다매체 즉, 토양, 침적물, 물, 공기 및 음식물에 대한 규정을 마련하고 있는 실정이다 (CCME, 1997; USEPA 1995). 그러나, 국내의 경우 금속원소의 대기 환경 중 납에 대한 기준 ( $0.5 \text{ ug/m}^3$ ), 토양 및 공산품에 관한 일부 기준만이 존재하며, 어린이대상시설 등의 실내 공기 및 다경로 (먼지, 제품표면 등)에 대한 기준은 없다. 따라서, 기준 비교를 통한 어린이시설의 금속원소 노출에 대한 수준평가는 현실적으로 어렵고, 또한 급성노출이 아닌 만성노출로 인한 당장의 유해영향을 파악하기 힘들다. 따라서, 건강 위험성평가 (Health Risk Assessment, 이하 HRA)를

통한 위해도에 따른 평가가 요구된다. 특히, 기준이 없는 유해 금속의 경우 오염물질의 다경로 노출로 인한 만성적 노출을 정량적으로 평가할 수 있는 방법 중의 하나가 HRA이다 (USEPA, 1997).

국외 연구결과를 살펴보면 어린이대상시설 중 실내놀이터 환경에 대한 연구는 꾸준히 진행되어 왔으나 (Wong and Mak., 1997; Granero and Domingo, 2002; Nadal et al., 2004), 실내 어린이 시설에 대한 자료는 많지 않다. 또한 국내의 경우도 어린이 환경보건정책에 대한 관심이 최근해야 부각되면서, 정책 자료로 활용할만한 자료의 양산이 요구되는 시점이다. 그럼에도 불구하고 외국의 경우 어린이노출 환경 즉, 가정, 보육시설 등의 유해물질의 잠재적인 다경로 노출에 대한 연구가 활발하지만 (Cohen et al., 2000a; Bradman et al., 2007; Perera et al., 2006; Tulse et al., 2007), 국내에서는 단일 경로 등의 제한적인 어린이 환경에 대한 일부 연구만이 진행되었다. 이러한 시점에서 보육시설 등 유아 및 어린이의 주요 활동 공간에서의 대표적인 유해 금속의 노출과 노출로 인한 민감집단의 위해성 등의 연구가 필요하다.

놀이방, 어린이집 등 보육시설 및 유치원의 경우 다소 차이는 있지만 대부분의 아동들은 4-10시간을 시설 내에 머물러 있어 가정 다음으로 실내 점유율이 높아, 제 2의 가정이라고 할 수 있다(김호현 등, 2010). 또한 실내놀이터의 경우 유료 및 무료이용시설로 구분되며, 백화점 및 대형마트, 할인점은 물론, 음식점, 병원 등 다양한 장소에 설치되어 있고, 최근 이러한 유료 및 무료 시설이 전 국단위로 증가하고 있다. 그러나, 이러한 시설의 경우 신고에 의해 허가가 되고, 관리 주체가 명확하지 않아 법제도 안에서 관리되고 있지 않은 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 어린이 주요활동공간인 보육시설 및 실내놀이터에서의 유해 금속의 다경로 노출로 인한 건강위해성평가를 통해 주요 노출 경로 파악 및 총 위해도를 산정하고자 한다.

## 2. 연구대상 및 방법

### 2.1 어린이 주요 활동 공간 측정대상 시설

#### 선정 및 조사 주요 내용

어린이 주요 활동공간인 실내놀이터 및 보육시설 (놀이방, 어린이집, 유치원)을 평가대상공간으로 지정하여 전국 6개 도시 (서울, 수원, 대전, 부산, 안산, 여수)의 각 실내놀이터 42개 시설, 놀이방 40개 시설, 어린이집 42개 시설, 유치원 44개 시설을 섭외하여 조사하였다 (지역별 5-8개 시설). 참고적으로 '07년도 기준으로 전국단위 보육시설은 33,499개, 유치원은 8,294개로서, 모집단을 대표할만한 평가대상 시설수를 선정해서 조사하기에는 현실적인 제한점이 있었고, 대도시, 중소도시, 공단지역을 포함하고, 신축시설, 소규모 및 대규모 시설도 포함되도록 구성 하였다. 본 연구에서는 기업체 및 공공단체에서 운영되는 보육시설 등은 포함되지 않았다.

여름 (1차)조사는 2007년 7월 - 9월, 3개월 동안 대상 시설 섭외 및 측정을 동시에 실시하였다. 겨울 (2차)조사는 2008년 1월 - 2월에 걸쳐 최종 시설별 2회 실시하였다. 시설 내 주 활동공간을 대표지점으로 하여 측정하였고, 시설별 1회 실시되었다.

시설 내 대표제품 표면시료 및 손표면시료는 겨울 (2차) 2008년 1-2월 동안 1회 실시되었다. 제품 표면 시료는 조사 대상지역 6개 지역 중 서울, 시

화공단, 부산, 여천공단 4 개 지역 중심으로 채취하였다. 4 개 지역 중 4 개군 (실내놀이터, 놀이방, 어린이집, 유치원) 각 시설의 3-4개의 대표제품군 (책상, 의자, 바닥매트 등)의 표면 시료를 채취하였고, 손 표면시료의 경우 각 시설별 5명의 어린이를 섭외하여 손 시료를 채취하였다.

시설 내 대표 공간 및 대표제품은 원장 및 보육교사, 업주를 통해 설문조사한 결과를 바탕으로 대표공간을 우선 선정하였고, 대표 공간 내 제품 중 접촉빈도가 높거나, 이용율이 높은 제품을 4순위까지 선정하여 대표 제품으로 하였다.

### 2.2 평가대상물질 및 노출경로 및 노출매체평가

대상물질은 금속원소 중 수은, 비소, 납, 카드뮴, 크롬, 니켈, 구리 등 7종 이었다. 주요 노출 매체는 바닥면지, 제품표면 및 어린이 손 표면을 평가하였다.

### 2.3 통계분석

측정된 결과는 평균과 농도 범위를 제시하였고, 실측 자료에 대한 통계분석은 SPSS 17.0 (Statistical package for the social science) 통계 package를 사용하였고, Kruskal-Wallis test를 사용하여 시설별 통계적 유의성을 보았다.

## 3. 측정 및 분석방법

### 3.1 시료채취 및 분석방법

#### 3.1.1 먼지 시료

먼지시료의 경우 2가지 방법으로 분류하여 측정 실시하였다. 먼저 호흡노출경로를 감안하여 실

내공기중의 미세먼지를 측정하였다. 미세먼지 (PM-10)는 환경부의 실내공기질 공정시험법의 다중이용시설의 측정방법을 기준으로 측정하였다.

본 연구에서는 연구대상시설의 실내공기중의 미세먼지 농도와 미세먼지 중의 주요 중금속을 채취하기 위하여 공기역학적 직경이 10  $\mu\text{m}$ 인 미세먼지(PM-10)는 mini-volume air sampler(Model 4.1, Airmetrics Co., USA)를 이용하여 5 L/min의 유량으로 채취하였으며, 채취에 사용된 필터는 MCE (Mixed Cellulose Ester, 0.45  $\mu\text{m}$  pore size,  $\phi$  47 mm, MFS. Inc) 필터를 사용하였다. 채취 완료된 필터는 데시케이터에서 48시간 이상 보관하여 항량한 후 감도 0.001 mg의 화학저울 (Ohaus, USA)을 이용하여 칭량하였다.

어린이의 먼지섭취의 주요노출경로로 예상되는 바닥 먼지시료의 채취는 먼지 (Dust) 용도에 맞게 제작된 진공청소기 (Vacuum cleaner)를 사용하여 진공청소기 홀더 (Holder)에 필터 (Whatman, 125 mm)를 장착하여 실내의 먼지를 채취하였다.

먼지 시료의 전처리에는 미국 환경보호청 (US, EPA) 3051A 방법에 준하여 실시하였으며, 그 과정은 다음과 같다. 시약종이 무게를 잰 후 0.05 g 이상의 일정량의 먼지를 옮긴 다음 시약종이 무게를 재어 전처리 먼지량을 정량한 후, 10 mL 바이알 (vial)에 깔대기를 대고 먼지를 덜어내어 질산 10 mL를 가한 후 초음파 추출기로 1시간 동안 추출하였다. 테프론 (Teflon) 용기에 추출한 내용물을 넣고 바이알(Vial)에 2 mL 질산으로 vial을 헹구고 난 후 다시 테프론 용기에 넣어, 마이크로웨이브 (Microwave digestion system)에서 160  $^{\circ}\text{C}$ 에서 1시간 가열하였다. 추출이 끝나면 용기를 상온에서 30분 동안 식힌 후 1.2  $\mu\text{m}$  GF/C 필터 (filter)로 여과하고 증류수로 25 mL로 희석하였다. 전처리가

끝난 시료는 유도결합플라즈마 질량분석계 (Inductively coupled plasma - Standard Method 3120B, IRIS Intrepid II XDL, Thermo electron coporation)로 분석하였다.

### 3.1.2 제품 표면시료

대표 제품 표면 시료 (Wipe samples)는 Adgate 등 (1995) 및 Liou 등 (1998)에 의해 선행 정립된 표면에 존재하는 먼지를 채취하는 표준화된 샘플링 프로토콜 (Sampling protocol)을 응용하여 실시하였다. 세부 프로토콜은 다음과 같다.

- 1) 필라멘트 폴리에스테르 (100% continuous filament polyester) (Alpha Wipe사의 TX1009 clean-room wipes) 재질의 천(synthetic wipe)을 7.5 cm $\times$ 7.5 cm (면적 56.25 cm $^2$ )의 규격으로 재단한 후, 손으로 부터의 오염을 막기 위해 플라스틱 장갑 (purple nitrile Xtra)을 착용하며,
- 2) 어린이들의 손이 빈번히 접촉할 것으로 예상되는 제품의 구멍이 없는 평탄한 표면을 문지르고
- 3) 20 cm 거리를 왕복 2회 문질러 채취
- 4) 1-3번을 5회 반복
- 5) 채취한 시료는 40 mL의 유리용기에 넣은 후 실온 보관하여 실험실로 운반하여 전처리를 실시하였다.

시료의 전처리에는 테프론 (Teflon) 용기에 넣고 10%의 질산 20 mL를 가한 후 용기의 마개를 막고, 마이크로웨이브 (microwave digestion system)에서 60  $^{\circ}\text{C}$ 에서 1시간 가열한다. 추출이 끝나면 용기를 상온에서 30분 동안 식힌 후 1.2  $\mu\text{m}$  GF/C filter로 여과하고 증류수로 50mL로 하여 희석한다. 전처리가 끝난 시료는 유도결합플라즈마 질량분석계 (Inductively coupled plasma - Standard Method 3120B, IRIS Intrepid II XDL, Thermo electron coporation)로 분석하였다.

Table 1. The Limit of detection of the multi-media

	Indoor air ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Dust ( $\mu\text{g}/\text{g}$ )	surface wipe ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ )	Hand-wipe ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ )
Pb	0.00003	2.05	0.00006	0.004
Cd	0.00001	1.56	0.00001	0.006
Cu	0.00009	6.79	0.0003	0.14
As	0.00007	0.12	0.00001	0.01
Ni	0.0004	0.21	0.0009	0.007
Cr	0.0003	3.30	0.0001	0.007
Hg	0.00002	0.03	0.00001	0.02

### 3.1.3 손 표면시료

어린이들의 손 표면 시료 (Wipe samples)는 Adgate 등 (1995) 및 Liou 등 (1998)에 의해 선행 정립된 표면에 존재하는 먼지를 샘플링하는 표준화된 샘플링 프로토콜 (Sampling protocol)을 응용하여 다음과 같이 실시하였다.

1) 어린이들이 놀이공간에서 놀기 전에 아이들의 손을 100 mL의 증류수로 깨끗이 씻어준 후 천으로 물기를 닦고 2) 손의 물기가 완전히 마른 후 각 개별적으로 놀이시간을 주어 평상시와 동일하게 행동하도록 하였다. 3) 놀이시간 후 어린이 손을 평탄한 곳에 두고 제품표면시료 채취에 사용된 동일한 재질의 천 (필라멘트 폴리에스테르) 을 사용하여 5명의 어린이의 손 샘플을 채취하였다. 전처리기가 끝난 시료는 유도결합플라즈마 질량분석계 (Inductively coupled plasma - Standard Method 3120B, IRIS Intrepid II XDL, Thermo electron corporation)로 분석하였다.

### 3.2 분석의 정도관리

ICP-MS를 이용하여 물질별로 MDL (Method Detection Limits)의 10배의 농도를 가진 시료를 7회 반복 측정하였을 때 정확도는 80-115%의 범위를 만족하였고, 정밀도는 RSD 로서 <20% 이내이

었다. 직선성의 경우는 각 물질별 농도 범위에서 표준물질을 제조하여 분석한 결과는 R값이 0.990 이상으로 나타나 선형성과의 상관성은 양호한 결과를 나타내었다. 매질별 회수율은 먼지시료 85-110%, 제품표면시료 70-90 %, 손표면시료 75-115 %로 매질별로 다소 차이는 있으나 신뢰 가능한 수준이었다. 유해 금속 원소의 물질 및 경로별 검출한계 (Limit of detection, LOD)는 Table 1과 같다.

### 3.3 건강위해성 평가

본 연구에서는 다음과 같이 대상 시설별 어린이 위해성 평가를 실시하였다. 대상 시설 및 연령은 놀이방 (6개월~만2세), 어린이집 (만 2~5세), 유치원 (만 5~6세), 실내놀이터 (만 3~9세)로 구분하였다.

위험성 분류는 미국 환경보호청 (US EPA)의 IRIS (Integrated Risk Information System) 및 WHO (World Health Organization) 등에서 제시하고 있는 독성 자료 고찰에 의해 인체 발암성 가능 물질은 발암성 물질로, 내분비계 장애영향 등 영아 (Infant), 유아 (Toddler) 및 어린이 (Child)에게 성장 및 면역 독성 등을 끼치는 물질은 어린이 민감영향 물질, 그 외 노출 시기에 상관없이 노출량에 의한 독성

Table 2. Exposure factors of children by video and observation

Site	Factor	Age groups (years)	Activity Type	Exposure routes	Specificity
Day-care home		0.5-2	Sitting/lying	Inhalation, Dermal(object), Ingestion(dust, hand)	Mean time spent 5~10hrs/day (frequency of activity time 2~7)
Child-care center		2	Sitting/lying/ Standing/ Walking	Inhalation, Dermal(object), Ingestion(dust, hand)	Mean time spent 5~10hrs/day (frequency of activity time 5~7)
		3-4	Sitting/lying/ Standing/ Walking/Running	Inhalation, Dermal(object), Ingestion(dust, hand)	* sleeping/meal time average time 3
		5	Sitting/ying Standing/ Walking/Running	Inhalation, Dermal(object), Ingestion(dust, hand)	
Kindergarten		6-7	Sitting/lying Standing/ Walking/Running	Inhalation, Dermal(object), Ingestion(dust, hand)	Mean time spent 5hrs/day *except sleeping
Indoor palyground		3-4	Sitting/lying Standing/ Walking, Running/Wallow	Inhalation, Dermal(object), Ingestion(dust, hand)	Weekday time spent 1~2time/wk
		5-9	Sitting/lying Standing/ Walking, Running/Wallow	Inhalation, Dermal(object), Ingestion(dust, hand)	Weekday time spent 1~2time/wk, except exposure hand-to-mouth

유발물질은 비발암독성 물질로 구분하였다.

평가 대상 금속원소의 위험성 구분은 비소, 카드뮴, 크롬, 니켈 발암성물질 4종으로 평가하고 납, 수은, 니켈의 경우 어린이 민감영향물질 3종 및 카드뮴, 구리, 크롬의 경우 비발암독성 3종으로 분류하여 발암 및 비발암 영향의 위해도 비교를 위해 중복 평가하였다.

용량·반응 평가시 발암성 및 비발암독성 물질의 정량적 독성 정보는 가능한 어린 시기 노출에 의한 독성 연구 자료를 일차적으로 선정하나, 부재 시에는 성인 자료를 활용하였다. 발암성 물질은

발암잠재력 (Cancer Potency Factor, 이하 CPF) 결정과정과 성인 자료 이용시 어린이보정계수 (Age Dependent Adjust Factor, 이하 ADAF) 적용도 동시 고려하여 평생초과발암위해도 (Excess Cancer Risk, ECR)를 산출하였다. 어린이민감영향 및 비발암 물질은 TDI (Tolerable Daily Intake) 결정과정을 거쳤고, TDI 자료 부재시 RfD (Reference dose) 값으로 대체하여 독성위험값 (Hazardous Quotient, 이하 HQ)을 산출하였다. 시설별, 물질별, 연령별 평생평균일일노출량 (LADD)의 확률분포값을 이용하여 인체 위해 확률분포값 산정하였다. 최종적

Table 3. Dose-response assessment of materials

Compounds	Classification of material	Exposure route	Endpoint	N(L)OAEI (mg/kg-day) (mg/m <sup>3</sup> )	UF (mg/kg-day)	RfD(C) (mg/kg-day) (mg/m <sup>3</sup> )	Reference
Lead	non carcinogenic	oral	reproductive toxicity	30	-	0.0035	Anderson (1983)
Mercury	non carcinogenic	inhalation	hand tremor	0.025	30	0.0003	Fawer (1983)
Cadmium	non carcinogenic	oral	proteinuria	0.005	10	0.0005	Foulkes (1986)
Arsenic	carcinogenic	oral	hyperpig- mentation	0.0008	3	0.0003	Blair (1990)
Chromium	non carcinogenic	oral	lung cancer	2.5	300	0.003	Glaser (1985)
Nickel	carcinogenic	oral	lung cancer	5	300	0.02	Chovil (1981)
Copper	non carcinogenic	oral	liver cancer	5	100	0.5	Casto (1979)

으로 인체 위해 확률분포의 50th% 해당값 및 95th% 해당값을 이용하였고, ECR는  $10^6 \sim 10^4$ , HQ는 0.1 ~ 1 초과 여부를 고려하여 위해 수준을 평가하였다.

### 3.3.1 노출 행태 조사

시설별 이용시간 등의 일반적인 내용은 보육교사를 통한 면접식 설문조사를 실시하였고, 노출량 계산을 위한 인자 값 도출 및 노출 형태분석을 위한 조사는 4개 연령그룹으로 분류하여 각 4인씩 총 16명을 관찰 조사하였다. 보육시설의 경우 보육교사 및 원장을 통해 면접식 설문을 실시하였고, 실내놀이터의 경우 시설 관리실장 또는 업주를 통해 면접식 설문조사를 하였다 (놀이 시간, 횟수, 요일별, 시간대별 및 기타 외).

어린이 노출형태조사를 통한 인자값의 결정 및 특이적 노출형태를 살펴보기 위해 보육시설의 경우 해당시설의 협조를 통해 자율놀이시간 40분을 비디오촬영을 진행하였다. 놀이형태에서는 서 있

기, 앉아 있기, 걷기, 뛰기, 뒹굴기 등의 형태를 조사하였다 (Table 2).

### 3.3.2 용량-반응 자료

대상물질의 건강위해성 평가를 위한 용량-반응 자료는 US EPA의 IRIS 및 WHO에서 공식적으로 제시하고 있는 독성 자료들을 수집, 고찰하여 결정하였다. 물질별 독성 정보 등은 Table 3과 같다.

### 3.3.3 노출시나리오 정립에 따른 노출인자 및 수식 적용

유해물질의 노출 경로 및 노출 시나리오를 통해 대상시설에서의 흡입, 섭취 및 피부접촉등의 총 노출 시나리오를 작성하였다.

흡입 노출 경로를 통해서만 보육시설, 유치원 및 실내놀이터의 실내 공기를 흡입함으로써 유해 원소에 노출될 수 있다. 피부 노출 경로를 통해서만 놀이 기구 표면과의 접촉, 바닥재 표면과의 접촉, 바닥 매트와의 접촉을 통해 금속 원소 등에 노

Table 4. Exposure factor \_ dermal migration ratio

Exposure Factor	Symbol	Compound	0.5~9 Age (years)	Probability distribution	Source
Dermal migration ratio	AP	Pb	0.006	-	IPCS INCHEM
		Cd	0.14	-	
		Cu	0.1	-	
		As	0.03	-	
		Ni	0.35	-	
		Cr	0.04	-	
		Hg	0.05	-	

출될 수 있다.

경구 섭취노출 경로는 놀이기구 제품 표면, 바닥 매트에 존재하는 유해물질이 손에 오염되어 입으로 가져가는 행위 (hand to mouth) 및 바닥먼지를 섭취함으로써 노출될 수 있다.

따라서, 총 노출 시에는 다음과 같은 세 가지 경로를 모두 고려하여 총 노출을 산정한다.

노출량 산정 수식에 적용되는 노출 인자들은 다음과 같이 문헌조사, 설문조사, 관찰조사, 실측 등

을 통해 도출된 값을 비교 검토하여 채택하였다. 각 노출경로별 대표 수식 (1), (2), (3) 및 수식에 사용된 값의 산출근거는 표 4, 5에 제시하였다.

### 3.3.4 위해도 산정

대상 물질 중 인체 발암 물질 4종 (비소, 카드뮴, 크롬, 니켈)에 대해서는 평생평균인체노출량 (LADD)와 발암잠재력 (Cancer Potency Factor,

$$E_{inh,ame} = C_{ame} * T_e * IR_{inh} * CF_T \quad (1)$$

Where  $E_{inh,ame}$  : inhalation exposure dose (mg/kg/day)

$C_{ame}$  : Concentration of indoor air at facility (mg/m<sup>3</sup>)

$T_e$  : Exposure time for exposure scenario (hr/day)

$IR_{inh}$  : Inhalation rate for exposure scenario (m<sup>3</sup>/hr)

$$E_{ingest,soil,k,e} = C_{dust,k} * IR_{dust} * T_{dust,k,e} \quad (2)$$

Where  $E_{ingest,soil,k,e}$  : Ingestion exposure dose (mg/kg/day)

$C_{dust,k}$  : Concentration of indoor dust at facility (mg/m<sup>3</sup>)

$T_{dust,k,e}$  : Exposure time for exposure scenario (hr/day)

$$E_{dermal,res,j,k,e} = SR_{res,k} * SA_j * F_{uncl,j} * F_{contact,res,j} * T_{res,k,e} * TE_{surf-skin} \quad (3)$$

Where  $E_{dermal,res,j,k,e}$  : Dermal exposure dose (mg/kg/day)

$SR_{res,k}$  : Concentration of product surface at facility (mg/m<sup>2</sup>)

$F_{contact,res,j}$  : Ratio of dermal contact area (m<sup>2</sup>/hr)

$T_{res,k,e}$  : Exposure time for exposure scenario (hr/day)

$TE_{surf-skin}$  : Dermal migration ratio (unitless)



Table 5. Exposure factor

Exposure Factor	Symbol	Age (years)				Probability distribution	Source
		0.5-2	3-4	5-6	7-9		
Body Weight							
Body Weight(kg)	BW	10	16	20	30	Log-normal	KEHF(2007)
Body Surface Area							
Body Surface Area(cm <sup>2</sup> )	SA <sup>1)</sup>	4352	6567	7914	9896	Log-normal	KEHF(2007)
SA:Head(unitless)	Fsa-fa	0.163	0.137	0.131	0.120	Uniform	US CEFH (2002)
SA:Trunk(unitless)	Fsa-bd	0.366	0.317	0.351	0.341	Uniform	US CEFH (2002)
SA:Hands(unitless)	Fsa-h	0.054	0.059	0.047	0.053	Uniform	US CEFH (2002)
SA:Arms(unitless)	Fsa-a	0.128	0.142	0.131	0.123	Uniform	US CEFH (2002)
SA:Legs(unitless)	Fsa-l	0.223	0.273	0.271	0.287	Uniform	US CEFH (2002)
SA:Feet(unitless)	Fsa-ft	0.066	0.073	0.069	0.076	Uniform	US CEFH (2002)
Ratio of Hand to mouth(unitless)	Fhm	0.130	0.130	0.130	0.130	Uniform	US CEFH (2002)
Inhalation and Ingestion rate							
Daily Inhalation rate(m <sup>3</sup> /day)	BRm	5.7	8.3	9.2	12.0	Log-normal	US CEFH (2002)
Activity Inhalation rate(m <sup>3</sup> /hr)	BRh	1.9	1.9	1.9	1.9	Triangle	US CEFH (2002)
Floor Dust Ingestion rate(mg/day)	IRdust	29.3	29.3	29.3	29.3	Log-normal	KEHF(2007)
Sucking							
Number of product sucking (time/hr)	Nmm	2	0.5	0.3	-	Triangle	NIER(2007)
Once sucking product (sec/time)	Tmm	17	17	17	-		
Number of hand sucking(time/hr)	Nhm	2	1	1	-		Zartarian (2005)
Once hand to mouth (sec/time)	Thm	6	1.5	1	-		
Remove suck the ratio	PFhm	0.78	0.78	0.78	0.78	Log-normal	
Contact etc							
Ratio of an hour per lying	CTsll	0.04	-	-	-	Triangle	This Study (Video survey)
Ratio of an hour per crawl	CTcw	0.02	-	-	-		
Ratio of an hour per standing	CTseat	0.26	0.25	0.30	0.20		NIER(2007), This Study(Video survey)
Ratio of an hour per sitting	CTstand	0.06	0.01	0.04	0.01		
Ratio of an hour per wallow	CTrr	-	0.50	0.50	0.50		Triangle
Ratio of an hour per hand to product	CThd2	0.41	0.50	0.80	0.80		
Ratio of an hour per hand to product (Indoor playground)	CThd2	-	1.00	1.00	1.00	Triangle	This Study (Video survey)
Ratio of skin contact when lying	CFfa	0.33	0.33	0.33	0.33	Log-normal	
Ratio of skin contact when crawl	CFbd	0.16	0.16	0.16	0.16		Zartarian (2005)
Ratio of skin contact when sitting	CFlg	0.2	0.2	0.2	0.2		
Ratio of skin contact when standing	CFft	0.5	0.5	0.5	0.5		Zartarian (2005)
Ratio of skin contact when hand	CFhd	0.74	0.74	0.74	0.74		
Period and Time							
exposure period(year)	EDindoor	1.5	2.0	2.0	3.0	-	This study
Number of standard time exposure(days)	ATnc	547.5	730	730	1095	-	
Number of child life time exposure(days)	AT	25550	25550	25550	25550	-	KEHF(2007)
Number of year exposure(days/yr)	Location	Daycare home	Childcare center	Kindergarten	Indoor playground	Triangle	This study
	EFindoor	258	258	258	36		
daily exposure(hr)	ETindoor	10	10	5	2	Uniform	This study
daily playing(hr)	ETj	7	7	5	2	Uniform	

<sup>1)</sup>SA = Skin surface area ratios.

CPF)을 이용하여 평생과발암위해도(Excess Cancer Risk, ECR)를 산출하였다. 이 때 발암성에 대한 CPF를 성인 또는 성체를 대상으로 한 용량-

반응 자료를 이용하여 산출하였을 경우에는 어린이 시기 노출로 인한 민감성을 보정하기 위해, 미국 환경보호청 (US EPA, 2005)에서 제시하고 있는

Table 6. Summary of quantitative estimates of trace elements in air

unit :  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 

Material	Descriptive statistics	Pb	Cd	As	Ni	Cr	Hg
Indoor		0.220	0.002	0.022	0.034	0.220	0.012
Playground (n=109)	Average	(<LOD ~	(<LOD ~	(<LOD ~	(<LOD ~	(<LOD ~	(<LOD ~
	Range	0.882)	0.021)	1.1815)	1.287)	1.312)	0.268)
Playroom (n=112)	Average	0.038	0.033	0.005	0.022	0.118	0.004
	Range	(<LOD ~	(<LOD ~	(<LOD ~	(<LOD ~	(0.039 ~	(<LOD ~
		1.612)	0.025)	0.039)	0.758)	1.240)	0.055)
Day-care center (n=120)	Average	0.030	0.009	0.015	0.078	0.243	0.005
	Range	(<LOD ~	(<LOD ~	(<LOD ~	(<LOD ~	(0.039 ~	(<LOD ~
		0.280)	0.119)	0.434)	3.541)	1.2406)	0.246)
Kindergarten (n=113)	Average	0.023	0.003	0.017	0.287	0.525**	0.003
	Range	(<LOD ~	(<LOD ~	(<LOD ~	(<LOD ~	(0.016 ~	(<LOD ~
		0.140)	0.02)	0.918)	18.028)	18.250)	0.042)

1) LOD : Limit of detection

\*\* p-value &lt; 0.01 (Kruskal-Wallis test)

ADAF값을 이용하였다. 대상군 중 만 2세 이하인 영아의 발암 물질에 대한 ADAF는 10, 만 3~9세인 유아, 미취학어린이 및 취학어린이의 ADAF는 3을 적용하였다 (US EPA, 2005). 즉, 유아 및 어린이시기의 노출을 반영하기 위해 2세 이전의 노출에 대해서는 10배 보정, 2-15세 사이의 노출에 대

해서는 3배 보정을 실시하였다 (Glaser et al., 1985). 위험성 평가에서 어린 시기 노출시 민감한 독성 영향이 유발될 수 있는 것으로 분류된 납, 수은, 니켈 (피부접촉) 3종은 용량-반응 평가에 의해 선정된 TDI (Tolerable Daily Intake)와 LADD값을 비교하여 독성위험지수 (Hazardous Index, HI)를

$$ECR = LADD(\text{mg/kg/day}) \times CPF \times ADAF \quad (4)$$

Where ECR : Excess Cancer Risk

LADD : Lifetime average daily dose (mg/kg/day)

CPF : Cancer Potency Factor

ADAF : Age Dependent Adjust Factor)

$$HQ/HI = \frac{LADD(\text{mg/kg/day})}{RfD} \quad (5)$$

Where HQ, HI : Hazardous Quotient, Hazard Index

LADD : Lifetime average daily dose (mg/kg/day)

RfD : Reference dose (mg/m<sup>3</sup>)

Table 7. Summary of quantitative estimates of trace elements in dust

unit :  $\mu\text{g/g}$ 

Material	Descriptive statistics	Pb	Cd	Cu	As	Ni	Cr	Hg
Indoor Playground (n=6)	Average	71.74	1.82	63.29	0.16	29.53	176.32	0.12
	Range	(18.74 ~ 145.25)	(0.78 ~ 3.56)	(20.71 ~ 128.85)	(0.06 ~ 0.70)	(12.94 ~ 79.43)	(91.73 ~ 267.38)	(0.02 ~ 0.32)
Playroom (n=10)	Average	74.86	4.68	164.58*	0.06	26.17	131.92	0.104
	Range	(11.27 ~ 214.48)	(0.78 ~ 18.67)	(3.40 ~ 777)	(0.06 ~ 0.15)	(5.36 ~ 55.13)	(50.03 ~ 227.85)	(0.02 ~ 0.19)
Day-care center (n=6)	Average	109.50	3.05	65.77	0.62	26.64	191.07	0.160
	Range	(26.65 ~ 427.00)	(0.78 ~ 7.22)	(31.35 ~ 135.30)	(0.06 ~ 1.97)	(14.87 ~ 40.17)	(137.40 ~ 303.45)	(0.05 ~ 0.34)
Kindergarten (n=6)	Average	279.62	7.75	34.22	0.06	18.90	186.62	0.29
	Range	(32.20 ~ 826)	(0.78 ~ 41.39)	(10.64 ~ 59.01)	(0.06 ~ 0.06)	(6.63 ~ 44.13)	(112.58 ~ 241.00)	(0.09 ~ 1.08)

\* p-value &lt; 0.05 (Kruskal-Wallis test)

산출하였다. 이때 대상물질의 TDI를 결정할 수 없는 물질의 경우에는 비발암 독성참고치, RfD를 대치하여 HI를 산출하였다. 발암 및 비발암 (독성 지수) 관련 수식 (4), (5)와 같다.

## 4. 연구 결과

### 4.1 시료 분석결과

#### 4.1.1 공기시료 분석결과

크롬의 경우 유치원 ( $0.287 \mu\text{g/m}^3$ ,  $0.525 \mu\text{g/m}^3$ ,  $0.021 \mu\text{g/m}^3$ )에서 다른 시설에 비해 평균이 높게 나타났고( $p < 0.01$ ), 카드뮴은 놀이방 ( $0.033 \mu\text{g/m}^3$ )에서 다른 시설에 비해 평균이 높게 나타났다. 납, 비소, 수은은 실내놀이터 ( $0.220 \mu\text{g/m}^3$ ,  $0.022 \mu\text{g/m}^3$ ,  $0.012 \mu\text{g/m}^3$ )에서 다른 시설에 비해 평균이 높게

조사되었다 (Table 6).

#### 4.1.2 먼지시료 분석결과

구리의 경우 놀이방에서 기타시설에 비해 통계적으로 유의하게 ( $p < 0.05$ ) 높게 검출되었고, 납과 수은의 경우 유치원 ( $279.62 \mu\text{g/g}$ ,  $0.286 \mu\text{g/g}$ )에서 다른 시설에 비해 평균이 조금 높게 나타났고, 비소와 크롬은 놀이방 ( $164.58 \mu\text{g/g}$ ,  $191.07 \mu\text{g/g}$ )에서 다른 시설에 비해 높은 평균을 나타냈다. 카드뮴은 유아학원 ( $21.58 \mu\text{g/g}$ )에서, 구리는 놀이방 ( $164.58 \mu\text{g/g}$ )에서 기타시설에 비해 유의하게 높게 나타났고 ( $p < 0.05$ ), 니켈은 실내놀이터 ( $29.53 \mu\text{g/g}$ )에서 타 시설에 비해 높은 평균을 나타내었으나, 통계적인 유의성은 없었다 (Table 7).

#### 4.1.3 대표제품 표면시료 분석결과

제품표면 시료는 노출 대상 다양한 어린이 연령대가 분포하는 어린이집을 대표적으로 조사하였

Table 8. Summary of quantitative estimates of metals in surface

unit :  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 

Material (n=20)		Pb	Cd	Cu	As	Ni	Cr	Hg
Day-care center	Average	0.005	0.00004	0.010	0.00007	0.00005	0.003	
	Range	(<LOD <sup>1)</sup> ~0.028)	(<LOD ~0.0002)	(<LOD ~0.032)	(<LOD ~0.0002)	(<LOD~ 10.00)	(<LOD ~0.009)	<LOD

<sup>1)</sup> LOD : Limit of Detection

다. 어린이집 실내공간 내 대표제품 (책상, 결상, 바닥매트) 표면에서 묻어나오는 중금속류의 평가 결과는 Table 8과 같다.

제품표면에서 수은은 검출되지 않았으며, 납과 구리의 경우 ( $0.005 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ,  $0.010 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) 다른 물질에 비해 평균이 높게 조사되었으나, 통계적인 유의성은 없었다.

$\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ,  $0.780 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 로 실내놀이터에서 다른 시설에 비해 통계적으로 유의하게 ( $p<0.05$ ) 높은 평균을 나타내었고, 니켈과 카드뮴의 경우 각각  $0.486 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ,  $0.064 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 로 놀이방에서 다른 시설에 비해 평균이 높게 조사되었으나, 통계적인 유의성은 없었다.

## 4.2 건강위해성평가 결과

### 4.1.4 어린이 손 표면시료 분석결과

각 대상시설별 어린이 개별 활동을 통해 손에서 묻어나오는 중금속 종류의 평가결과는 Table 9와 같다. 크롬과 구리, 납의 경우 각각  $0.084 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ,  $2.770$

### 4.2.1 발암성물질의 평가

비소, 카드뮴, 크롬, 니켈 4종 발암성 물질의 대상 시설별, 연령군별 초과발암위해 수준은 Table

Table 9. Summary of quantitative estimates of metals in hand surface

unit :  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 

Material (n=20)	Descriptive statistics	Cr	Ni	Cu	Cd	Pb	As	Hg
Indoor		0.084	0.225	2.770	0.017	0.780*	0.028	
Playground (n=5)	Average	(0.003 ~	(0.003 ~	(0.072 ~	(0.003 ~	(0.275 ~	(0.005 ~	<LOD
	Range	0.231)	0.533)	13.559)	0.028)	1.767)	0.124)	
Playroom (n=5)	Average	0.048	0.380	0.072	0.041	0.219	0.086	
	Range	(0.003 ~	(0.003 ~	(0.072 ~	(0.018 ~	(0.058 ~	(0.005 ~	<LOD
		0.245)	0.575)	0.072)	0.056)	0.430)	0.141)	
Day-care center (n=5)	Average	0.008	0.478	0.446	0.059	0.463	0.040	
	Range	(0.003 ~	(0.019 ~	(0.072 ~	(0.036 ~	(0.301 ~	(0.005 ~	<LOD
		0.023)	1.244)	~1.394)	~0.103)	~0.687)	0.088)	
Kindergarten (n=5)	Average	0.046	0.486	0.072	0.064	0.656	0.071	
	Range	(0.003 ~	(0.003 ~	(0.072 ~	(0.009 ~	(0.334 ~	(0.005 ~	<LOD
		0.174)	1.638)	0.072)	~0.132)	~0.930)	0.139)	

\* p-value &lt; 0.05 (Kruskal-Wallis test)

Table 10. Lifetime excess cancer risk estimates for 50th percentile value of carcinogens application ADAF

Facility	Age	ADAF application Lifetime Excess cancer risk 50th percentile value (person)			
		As	Cd	Cr	Ni
(1) Total Cancer Risk ratio					
Day-care home	0.5-2 age	1.38×10 <sup>-6</sup>	2.04×10 <sup>-7</sup>	2.33×10 <sup>-5</sup>	1.16×10 <sup>-7</sup>
Child-care center	3-4 age	8.40×10 <sup>-7</sup>	2.17×10 <sup>-7</sup>	6.78×10 <sup>-6</sup>	1.20×10 <sup>-7</sup>
Kindergarten	5-6 age	2.76×10 <sup>-7</sup>	5.54×10 <sup>-8</sup>	4.37×10 <sup>-6</sup>	1.93×10 <sup>-7</sup>
	3-4 age	6.56×10 <sup>-9</sup>	7.33×10 <sup>-10</sup>	1.17×10 <sup>-7</sup>	6.90×10 <sup>-10</sup>
Indoor Playground	5-6 age	5.22×10 <sup>-9</sup>	5.89×10 <sup>-10</sup>	9.56×10 <sup>-8</sup>	5.71×10 <sup>-10</sup>
	7-9 age	4.95×10 <sup>-9</sup>	5.95×10 <sup>-10</sup>	9.49×10 <sup>-8</sup>	5.61×10 <sup>-10</sup>
(2) Inhalation Cancer Risk					
Day-care home	0.5-2 age	1.33×10 <sup>-6</sup>	2.04×10 <sup>-7</sup>	2.33×10 <sup>-5</sup>	1.16×10 <sup>-7</sup>
Child-care center	3-4 age	8.10×10 <sup>-7</sup>	2.17×10 <sup>-7</sup>	6.78×10 <sup>-6</sup>	1.20×10 <sup>-7</sup>
Kindergarten	5-6 age	2.73×10 <sup>-7</sup>	5.54×10 <sup>-8</sup>	4.37×10 <sup>-6</sup>	1.93×10 <sup>-7</sup>
	3-4 age	6.25×10 <sup>-9</sup>	7.33×10 <sup>-10</sup>	1.17×10 <sup>-7</sup>	6.90×10 <sup>-10</sup>
Indoor Playground	5-6 age	4.99×10 <sup>-9</sup>	5.89×10 <sup>-10</sup>	9.56×10 <sup>-8</sup>	5.71×10 <sup>-10</sup>
	7-9 age	4.73×10 <sup>-9</sup>	5.95×10 <sup>-10</sup>	9.49×10 <sup>-8</sup>	5.61×10 <sup>-10</sup>
(3) Intake Cancer Risk					
Day-care home	0.5-2 age	4.07×10 <sup>-8</sup>	- <sup>2)</sup>	-	-
Child-care center	3-4 age	2.84×10 <sup>-8</sup>	-	-	-
Kindergarten	5-6 age	2.78×10 <sup>-9</sup>	-	-	-
	3-4 age	3.12×10 <sup>-10</sup>	-	-	-
Indoor Playground	5-6 age	2.29×10 <sup>-10</sup>	-	-	-
	7-9 age	2.23×10 <sup>-10</sup>	-	-	-
(4) Skin exposure Cancer Risk					
Day-care home	0.5-2 age	1.43×10 <sup>-9</sup>	-	-	-
Child-care center	3-4 age	1.48×10 <sup>-9</sup>	-	-	-
Kindergarten	5-6 age	5.64×10 <sup>-10</sup>	-	-	-
	3-4 age	- <sup>1)</sup>	-	-	-
Indoor Playground	5-6 age	-	-	-	-
	7-9 age	-	-	-	-

<sup>1)</sup> : As not detected in surface product<sup>2)</sup> : Not information of toxicity by ingestion and dermal contact

10 에 제시하였다. ADAF를 보정한 경우 초과발암위해도 50th% 해당값은 총 노출경로에 의해서  $10^{-10} \sim 10^{-6}$  범위로 산출되었으며, 흡입 노출  $10^{-10} \sim 10^{-5}$  범위, 섭취 노출  $10^{-10} \sim 10^{-7}$  범위, 피부 노출  $10^{-10} \sim 10^{-9}$  의 범위로 평가되었다.

#### 4.2.2 어린이 민감영향 물질의 평가

납, 수은, 니켈 3종 어린이 민감영향 물질의 대상 물질별, 연령군별, 노출인자 및 노출시나리오를 종합하여 어린이 민감영향 물질의 독성위험지수(HI : Hazard Index)를 산출하였으며, HI 수준은

Table 11. Total hazard index estimates for 50th percentile value of child sensitive effect material

Facility	Age	Total Hazard Index_ 50th percentile value (person)		
		Pb	Hg	Ni
(1) Total sensitivity Hazard Index value				
Day-care home	0.5-2 age	0.0606	0.0011	0.0007
Child-care center	3-4 age	0.0586	0.0010	0.0010
Kindergarten	5-6 age	0.1079	0.0006	0.0004
	3-4 age	0.0025	<0.0001	<0.0001
Indoor - Playground	5-6 age	0.0020	<0.0001	<0.0001
	7-9 age	0.0014	<0.0001	<0.0001
(2) Inhalation sensitivity Hazard Index value				
Day-care home	0.5-2 age	0.0016	0.0008	<0.0001
Child-care center	3-4 age	0.0033	0.0007	0.0001
Kindergarten	5-6 age	0.0016	0.0003	0.0001
	3-4 age	<0.0001	<0.0001	<0.0001
Indoor - Playground	5-6 age	<0.0001	<0.0001	<0.0001
	7-9 age	<0.0001	<0.0001	<0.0001
(3)Intake sensitivity Hazard Index value				
Day-care home	0.5-2 age	0.0588	0.0003	0.0007
Child-care center	3-4 age	0.0552	0.0003	0.0007
Kindergarten	5-6 age	0.1062	0.0002	0.0003
	3-4 age	0.0025	<0.0001	<0.0001
Indoor - Playground	5-6 age	0.0020	<0.0001	<0.0001
	7-9 age	0.0013	<0.0001	<0.0001
(4)Skin exposure sensitivity Hazard Index value				
Day-care home	0.5-2 age	0.0001	<0.0001	<0.0001
Child-care center	3-4 age	0.0001	<0.0001	0.0003
Kindergarten	5-6 age	0.0001	<0.0001	<0.0001
	3-4 age	<0.0001	<0.0001	<0.0001
Indoor - Playground	5-6 age	<0.0001	<0.0001	<0.0001
	7-9 age	<0.0001	<0.0001	<0.0001

Table 11에 제시하였다.

어린이민간영향 물질로 인한 독성위험지수, HI의 50th% 해당값은 총 노출경로에 의해서는 <0.0001 ~ 0.10 범위로 산출되었으며, 흡입 노출은 <0.0001 ~ 0.9, 섭취 노출은 <0.0001 ~ 0.10, 피부노출의 HI는 <0.0001 ~ 0.02 수준으로 산출되었다.

대상 발암 물질 중 납의 총독성위험지수가 0.001 ~ 0.11로서 가장 높은 값으로 평가되었다.

납의 경우 흡입 (실내공기), 섭취 (실내먼지), 피부노출 (제품, 손)로 구분하여 평가하였을 때 놀이방, 어린이집에서는 흡입 (실내공기)으로 인한 노출이 52~57% 기여하고 있었고, 섭취(실내먼지)

30~44%, 유치원의 경우 흡입 (실내공기) 29%, 섭취 (실내먼지) 59%, 피부 (제품, 손)로의 노출이 12%의 기여도를 나타냈다. 놀이방, 어린이집, 유치원의 경우 일반적인 놀이 및 학습형태로 인한 노출 특성이 반영된 결과로 판단된다.

#### 4.2.3 비발암성물질의 평가

카드뮴, 구리, 크롬 3종의 비발암성 물질의 대상 시설별, 연령군별 위해 수준은 어린이 민감영향물질과 동일하게 낮은 수준으로 산출되어 자세한 결과표는 제시하지 않는다.

비발암성 물질로 인한 비발암 독성위험값, 50th% 해당값 값은 총 노출경로에 의해서는  $<0.0001 \sim 0.03$  범위로 산출되었으며, 흡입 노출 비발암 독성위험값은  $<0.0001 \sim 0.03$  범위, 섭취 노출 비발암 독성위험값은  $<0.0001 \sim 0.003$  범위, 피부노출 비발암 독성위험값은  $<0.0001$  이하로 산출되었다. 95th% 해당값 또한 위해수준이하로 산출되었다.

### 5. 고찰

본 연구에서 어린이 대표적인 활동공간인 보육 시설 및 실내놀이터 공간에서의 활동으로 인한 주요 유해 금속 원소의 다경로 노출을 분석한 결과 실내공기에서 뿐만 아니라 실내바닥먼지, 실내공간내의 대표제품 표면 및 어린이들의 손에서도 크롬(Cr), 납(Pb) 등이 검출되었고, 어린이 노출형태를 감안한 위해성평가를 통해 잠재적인 위해 가능성이 있는 것으로 도출되었다. 이는 평생평균일일 노출량 (LADD)의 확률분포값을 이용하여 본 시설을 이용하는 기간동안 같은 농도로 노출된다는

불확실성을 감안한 결과이다.

어린이는 먼지섭취량이 성인보다 높은 것으로 알려져 있고, 영유아들의 기어다니기, 빨기 등의 특이적 행동 특성에 의해 높은 위해를 가질 수 있다 (Tulve et al., 2002). 크롬(Cr)의 경우는 실외오염원에 의한 영향이 실내오염원으로 인한 영향보다 크다. 본 연구에서도 유치원의 크롬이 타 시설에 비해 통계적으로 유의하게( $p<0.01$ ) 높게 나타났다. 대부분의 시설이 공단지역에 위치하고 있었고, 도심 내 위치하여 주변 교통량이 많은 시설에서 주로 높게 측정되었다. 납(Pb)의 경우도 실내오염원과 일부 실외오염원의 유입으로 인한 실내공기, 실내바닥먼지, 제품표면 및 어린이의 손 등으로 인한 흡입, 피부접촉, 먼지섭취로 다경로 노출이 가능한 것으로 평가되었다. 납의 경우 특히 어린시기에 만성 노출 시 신경 발달, 신경행동학적 이상 및 발달장애를 유발 하였다. 장기 노출 시 세포괴사, 혈액암, 신장 중양을 유발 시킨다 (Nriagu et al., 1998).

국내 선행연구 (윤충식, 2006)에서 유치원과 어린이집에서의 납의 평균농도는  $0.037 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 유사한 수준을 나타냈다. 본 연구에서 보육시설의 공기중 중금속 농도는 크롬  $0.32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 비소  $0.012 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 납  $0.03 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 크롬이 가장 높았다. 제품 표면 시료 중 납의 경우 ( $0.0052 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) 다른 물질에 비해 평균이 조금 높게 조사되었으며, 국내 선행연구 (윤충식, 2006)와 비교하면, 바닥의 표면시료 농도는 낮은 농도분포를 나타냈다. 납의 경우 납 함유 페인트의 실내 유입에 의한 경로와 납 함유 페인트를 직접 사용함으로 인한 실내 오염이 공존한다 (Gulson et al., 1995; Walraven et al., 1997). 특히 어린이 시설에서는 색감이 다채로운 실내 가구 및 장난감 등의 사용이 빈번하며, 이들

제품의 색감을 위해 사용하는 재료에는 대부분 납이 함유되어 있을 가능성이 높다.

본 연구에서 대상 시설에서의 납에 의한 어린이 민감독성 위험값의 50th%은 유치원 5-6세에서 0.1 수준이었으나, 95th%값에서 어린이집 0.5-2세 및 유치원 5-6세에서 0.5 수준으로 예측되어 잠재적인 유해 가능성이 있는 물질로 평가되었다. 특히 납은 다른 관리 항목과는 달리 실내 먼지 오염을 통한 섭취 노출로 인한 기여율이 전체 90% 이상 차지하고 있어 주기적인 실내 먼지 제거를 통한 관리가 요구된다. 선행연구 (Rhoads et al., 1999)에서도 어린이 납 노출의 주요 원인은 실내의 바닥 먼지이며, 혈중 납(Pb) 축적의 기여인자로 언급하였고, 영유아의 손에서 입으로 가져가는 행동(hand-to-mouth)은 이러한 먼지 섭취의 주요 특성이라고 하였다 (HUD, 1995).

일반적으로 금속원소 중 철, 칼륨, 칼슘, 마그네슘 등은 자연적으로 주로 존재하는 대표 물질이며, 도시 환경에서 크롬, 납, 카드뮴, 수은, 니켈 및 아연 등은 산업활동 등으로 인한 대표 유해 금속이다 (Miguel et al., 2007). 따라서, 실내 자체 오염원 뿐만 아니라 외부 유입에 의한 영향도 존재한다. 본 연구에서 잠재적인 영향물질로 확인된 납 및 크롬의 경우 실내외 영향이 공존함에 따른 결과로 추정된다.

본 연구에서 6개 도시의 보육시설, 유치원 및 실내놀이터의 금속 원소 실태조사를 통한 한 다경로 위해성평가를 실시하였다. 그러나 대상시설의 적극적인 장소 협조 문제 등의 한계점으로 인해 모집단 분포에 비례에 따른 대표 시설 표본 추출(규모, 면적, 건축년도, 위치 등)이 이루어지지 않았고, 계절별 1회 측정으로 인한 실측 자료의 대표성 문제 등 근본적인 제한점을 가지고 있다. 특

히, 실내놀이터의 경우 업종별로 개별적으로 관리되고 있는 무료 실내놀이터의 자료가 포함되지 못한 제한점도 가지고 있다. 또한, 노출량 산정을 위한 변수 및 시나리오 도출시의 대표성 부재 및 먼지 섭취율 및 피부흡수율 등 외국자료 사용으로 인한 근본적인 한계점은 존재한다. 이러한 부분은 노출 실태조사를 바탕으로 한 위해성평가 연구에서 나아가 어린이의 실제적인 건강문제를 다룰 시점에서 보완되어야 할 부분이다.

## 6. 결론

본 연구에서는 어린이 대상시설 즉, 보육시설(놀이방, 어린이집), 유치원 및 실내놀이터(유료 및 무료) 내 금속원소의 다경로(흡입, 섭취, 피부접촉)노출로 인한 위해성평가를 실시하였다. 전국 6개 도시(서울, 수원, 대전, 부산, 안산, 여수)의 실내놀이터 42개 시설, 놀이방 40개 시설, 어린이집 42개 시설, 유치원 44개 시설을 최종 조사하였고, 평가 항목은 수은, 비소, 납, 카드뮴, 크롬, 니켈, 구리 등 7종이었다.

어린이 독성자료 및 노출행태가 반영된 최종 건강위해성평가 중 발암성물질의 평가 결과 ADAP를 보정한 경우 초과발암위해도 50th% 해당값은 총 노출경로에 의해서는  $10^{-10} \sim 10^{-6}$  범위로 산출되었으며, 흡입 노출  $10^{-10} \sim 10^{-5}$  범위, 섭취 노출  $10^{-10} \sim 10^{-7}$  범위, 피부노출  $10^{-10} \sim 10^{-9}$ 의 범위로 산출되었다. 크롬이  $10^{-5}$ 의 수준으로 관찰되어 잠재적인 위해 가능성이 관찰되었다.

어린이민간영향 물질로 인한 독성위험지수, HI의 50th% 해당값은 총 노출경로에 의해서는  $<0.0001 \sim 0.10$  범위로 산출되었으며, 흡입 노출은



<0.0001 ~ 0.9, 섭취 노출은 <0.0001 ~ 0.10, 피부노출의 HI는 <0.0001 ~ 0.02 수준으로 산출되었다. 대상 발암 물질 중 납의 총독성위험지수가 0.11로서 가장 높은 값으로 산출되었다. 향후 금속 원소 뿐만아니라 어린이 시설에 대한 다양하고 지속적인 모니터링 및 어린이 주요 질환 등 건강 문제와의 관련성 연구가 더욱 요구된다.

## 감사의 글

이 연구는 환경부 (환경정책실 환경보건정책과)의 “어린이 활동 공간 위해성평가” 사업 지원 (2008)으로 수행된 연구결과의 일부이며, 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

김호현, 양지연, 이청수, 김선덕, 양수희, 신동천, 임영욱 (2010) 보육시설 및 실내놀이터의 Aldehydes 노출 및 위해성평가, 한국실내환경학회지, 7(2), 89-100.

윤충식, 백도현 (2006) 유아교육시설의 표면 및 공기 중 납 농도 평가, 한국환경보건학회지, 32(1), 1-7.

장재연, 정해관 (2006) 한국형 노출지수 개발 및 운용체계 구축, 차세대 핵심환경기술개발사업.

환경부 (2008) 어린이 위해성평가 · 관리를 위한 어린이 시설 유해물질 오염 실태 조사 사업.

Adgate, J.L. Weisel, C. Wang, Y. Rhoads, G.G. Liroy, P.J. (1995) Environmental Research, 70, 134-147, *Lead in house dust: relationships be-*

*tween exposure metrics.*

Blair, P.C. Thompson, M.B. Bechtold, M. Wilson, R.E. Moorman, M.P. Fowler, B.A. (1990) Toxicology, 63(1), 25-34, *Evidence of oxidative damage to red blood cells in mice induced by arsine gas.*

Boyd, H.B. Pedersen, F. Cohr, K.H. Damborg, A. Jakobsen, B.M. Kristensen, P. Samsøe-Petersen, L. (1999) Regulatory Toxicology and Pharmacology, 30, 197-208, *Exposure scenarios and guidance values for urban soil pollutants.*

Bradman, A. Whitaker, D. Quiros, L. Castorina, R. Henn, B.C. Nishioka, M. Morgan, J. Barr, D.B. Harnly, M. Brisnin, J.A. Sheldon, L.S. McKone, T.E. Eskenazi, B. (2007) Journal of exposure science & environmental epidemiology, 17(4), 331-349, *Pesticides and their metabolites in the homes and urine of farmworker children living in the Salinas Valley, CA.*

Casto, B.C. J. Meyers, J.A. (1979) Cancer Research, 39, 193-198, DiPaolo. *Enhancement of viral transformation for evaluation of the carcinogenic or mutagenic potential of inorganic metal salts.*

CCME (Canadian Council of Ministers of the Environment) (1997) Winnipeg, Manitoba, Canada, *Recommended Canadian Soil Quality Guidelines. Canadian Council of Ministers of the Environment.*

Chovil, A. Sutherland, R.B. Halliday, M. (1981) British Journal of Industrial Medicine, 38, 327-333, *Respiratory cancer in a cohort of sinter plant workers.*

Cohen Hubal E.A., Sheldon L.S., Burke J.M., McCurdy T.R., Berry M.R., Rigas M.L., Zartarian

- V.G., and Freeman N.C.G. (2000a) Environmental Health Perspectives, 108(6), 475-486, *Children's exposure assessment: a review of factors influencing children's exposure, and the data available to characterize and assess that exposure.*
- Fawer, R.F. Y de Ribaupierre, Guillemin, M.P. Berode, M. Lobe, M. (1983) British Journal of Industrial Medicine, 40, 204-208. *Measurement of hand tremor induced by industrial exposure to metallic mercury.*
- Foulkes, E.C. (1986) Ed. Springer Verlag, Berlin, 80, 75-100, *Absorption of cadmium. In: Handbook of Experimental Pharmacology.*
- Glaser, U. Hochrainer, D. Kloppel, H. Kuhnen, H. (1985) Archives of toxicology, 57(4), 250-256, *Low level chromium (VI) inhalation effects on alveolar macrophages and immune function in Wistar rats.*
- Granero, S. Domingo, J.L. (2002) Environment international, 28, 159-164, *Levels of metals in soils of Alcalá de Henares, Spain: human health risks.*
- Gulson, B.L. Davis, J.J. Mizon, K.J. Korsch, M.J. Bawdensmith, J. (1995) Science of the Total Environment, 166, 245-262, *Sources of lead in soil and dust and the use of dust fallout as a sampling medium.*
- HUD (1995) U.S. Department of housing and urban development. *HUD Guidelines for the evaluation and control of lead-based paint hazards in housing.*
- Lee, C.S.L. Li, X.D. Shi, W.Z. Cheung, S.C.N. Thornton, I. (2005) The Science of the Total Environment, in press, *Metal contamination in urban, suburban and country park soils of Hong Kong: a study based on GIS and multivariate statistics.*
- Lin, Z.X. Harsbo, K. Ahlgren, M. Qvarfort, U. (1998) The Science of the Total Environment, 209, 47-58, *The source and fate of Pb in contaminated soils at the urban area of Falun in central Sweden.*
- Lioy, P.J. Yiin, L.M. Adgate, J.L. Weisel, C. Rhoads, G.G. (1998) Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology, 8, 17-35, *The effectiveness of the CLEARS home cleaning intervention in reducing dust loading, lead loading and lead concentration.*
- Mesilio, L. Farago, M.E. Thornton, I. (2003) Environmental Geochemistry and Health, 25, 1-8, *Reconnaissance soil geochemical survey of Gibraltar.*
- Mielke, H.W. Reagan, P.L. (1998) Environmental Health Perspectives, 106(1), 217-229, *Soil is an important pathway of human lead exposure.*
- Miguel, E. Iribarren, I. Chacon, E. Ordonez, A. Charlesworth, S. (2007) Chemosphere, 66, 505-513, *Risk-based evaluation of the children to trace elements in playgrounds in Madrid (Spain).*
- Nadal, M. Schuhmacher, M. Domingo, J.L. (2004) Science of The Total Environment, 321, 59-69, *Metal pollution of soils and vegetation in an area with petrochemical industry.*
- National Environmental Protection Agency, China (1995) GB 15618, Beijing, China, *Environmental Quality Standard for Soils.*
- Nriagu, J.O. Pacyna, J.M. (1988) Nature, 333,

- 134-139, *Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals*.
- Perera, F. Viswanathan, S. Whyatt, R. Tang, D. Miller, R.L. Rauh, V. (2006) *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1076, 15-28, *Children's environmental health research-highlights from the Columbia Center for Children's Environmental Health*.
- Purves, D. Mackenzie, E.J. (1970) *Plant and Soil*, 33, 483-485, *Enhancement of trace-element content of cabbages grown in urban areas*.
- Rhoads, G.G. Ettinger, A.S. Weisel, C.P. Buckley, T.J. Goldman, K.D. Liroy, P.J. (1999) *Pediatrics*, 103(3), 551-555, *The effect of dust lead control on blood lead in toddlers: a randomized trial*.
- Thatcher, R.W. Lester, M.L. McAlaster, R. Horst, R. (1982) *Archives of environmental health*, 37(3):159-66, *Effects of low levels of cadmium and lead on cognitive functioning in children*.
- Thornton, I. (1993) *Applied Geochemistry Suppl.* 2, 203-210, *Environmental geochemistry and health in the 1990s: a global perspective*.
- Tulve, N.S. Jones, P.A. McCurdy, T. Croghan, C.W. (2007) *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 78(4), 375-383, *A pilots tudy using an accelerometer to evaluate a caregiver's interpretation of their infant or toddler's activity level as recorded in a time activity diary*.
- Tulve, N.S. Suggs, J.C. McCurdy, T. Cohen Hubal, E.A. Moya, J. (2002) *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 12, 259 - 64, *Frequency of mouthing behavior in young children*.
- US EPA (US Environmental Protection Agency) (1997) *Exposure Factors Handbook - General Factors*. EPA/600/P-95/002Fa, vol. I. Office of Research and Development, National Center for Environmental Assessment. US Environmental Protection Agency, Washington, DC. Available from: <<http://www.epa.gov/ncea/pdfs/efh/front.pdf>>.
- US EPA (2005) *Supplemental guidance for assessing susceptibility from early-life exposure to carcinogens*.
- US EPA (2006) *A framwork for assessing health risks of environmental exposures to children*(EPA/600/R-05/093F).
- Walraven, N. vanOs, B.J.H. Klaver, G.T. Baker, J.H. Vriend, S.P. (1997) *Journal of Geochemical Exploration*, 59, 47-58, *Trace element concentrations and stable lead isotopes in soils as tracers of lead contamination in Graft-DeRijp, the Netherlands*.
- Wong, J.W.C. Mak, N.K. (1997) *Environmental technology*, 18, 109 - 115, *Heavy metal pollution in children playgrounds in Hong Kong and its health implications*.
- Zartarian, V.G. Xue, J. Ozkaynak, H. Dang W. Glen, G. Smith, L. Stallings, C. (2005) *A Probabilistic Exposure Assessment for Children Who Contact CCA-Treated Playsets and Decks Using the Stochastic Human Exposure and Dose Simulation Model for the Wood Preservative Exposure Scenario (SHEDS-Wood)*.